



Warszawa, 28 września 2023

prof. dr hab. Piotr Szymczak
Instytut Fizyki Teoretycznej
Wydział Fizyki UW

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Damiana Zaremby pt.
„Sequential logic and iterative systems in droplet microfluidics”**

Rozprawa doktorska mgr inż. Damiana Zaremby poświęcona jest kontroli hydrodynamicznej nad kropelkami układach mikroprzepływowych. Mikrofluidyka kropelkowa to dynamicznie rozwijająca się dziedzina nauki i technologii, która zajmuje się kontrolowaniem i manipulacją małymi objętościami płynów w mikroskali. Choć jej korzenie sięgają już kilku dekad wstecz, to ostatnie lata przyniosły ogromny rozwój tej dziedziny i otworzyły drzwi do wielu nowych zastosowań w medycynie, biologii, chemii, elektronice i wielu innych dziedzinach. W odróżnieniu od dynamiki płynów w skali makro, która kojarzy nam się z niestabilnościami i nieprzewidywalnością, ruch kropelek w układach mikrofluidycznych jest wysoce regularny i zsynchronizowany, przywodząc na myśl automat lub maszynę cyfrową. Są dwie przyczyny tego stanu rzeczy – po pierwsze prędkości płynu w kanałach mikrofluidycznych są niskie, a rozmiary kanałów – mikroskopowe, przez co liczby Reynoldsa charakteryzujące przepływ są bardzo małe, a co za tym idzie przepływy są laminarne. Po drugie, informacja w układach mikrofluidycznych kodowana jest poprzez obecność kropli (kropla – 1, brak kropli – 0), i taki cyfrowy zapis jest dużo mniej podatny na zakłócenia niż zapis analogowy.

Aby jednak można było budować zautomatyzowane stanowiska mikrofluidyczne, które będą wykonywały określone zadania bez zewnętrznych elementów sterujących, trzeba najpierw opracować elementarne komponenty architektury mikroprzepływowej, z których – analogicznie do bramek logicznych – można potem budować układy logiczne. Co ciekawe, naturalna dla układów mikrofluidycznych nie jest tradycyjna logika kombinatoryczna, lecz raczej logika sekwencyjna. Obecność kropli w różnych miejscach układu można interpretować jako jego wewnętrzny stan, a cały układ wtedy może być następnie interpretowany jako automat skończony, z możliwością dyskretnych przejść pomiędzy poszczególnymi stanami.

Rozwinięciem tych właśnie zagadnień w kontekście mikrofluidyki kropelkowej poświęcona jest Rozprawa Doktorska mgr inż. Damiana Zaremby. Na Rozprawę składa się cykl sześciu artykułów opublikowanych w latach 2018–2022 w dobrych i bardzo dobrych czasopismach naukowych, włączając prestiżowe *Nature Communications*, *Chemical Engineering Journal* czy *Lab on a Chip*. W czterech z tych artykułów (A-D) mgr inż. Zaremba jest pierwszym autorem i z opisu jasno wynika, że jego wkład był tu dominujący – p. Zaremba stworzył koncepcję i projektował geometrię urządzeń mikroprzepływowych, jak również budował i automatyzował konfiguracje eksperymentalne, przeprowadzał eksperymenty, zbierał dane oraz je analizował, a także – wraz ze współautorami – spisywał publikacje. W dwóch

ostatnich pracach (E i F) jego wkład nie był dominujący, ale ważny, polegający na przeprowadzaniu eksperymentów i analizowaniu pochodzących z nich danych.

Artykuł A poświęcony jest analizie mikrofluidycznej pułapki tnącej (metering trap), zaproponowanej we wcześniejszej pracy Korczyka i in. (Lab Chip, 2013, 13, 4096). Ta wcześniejsza publikacja co prawda demonstrowała działanie pułapki, jednak nie tłumaczyła mechanizmu jej działania; lukę tę wypełnił właśnie artykuł A, w którym została przebadana kinetyka kropli w kanałach mikrofluidycznych, jej oddziaływanie z pułapką oraz profile prędkości fazy ciągłej w szczelinie przelewowej. Szczelina ta pozwala cieczy ciągłej płynąć, nawet kiedy w pułapce znajduje się kropla (pod warunkiem, że długość kropli nie przekracza długości pułapki). Pokazano w szczególności, że w trakcie przepływu kropli przez pułapkę aktywowane są lub dezaktywowane szczeliny przelewowe, co stanowi podstawę działania pułapki. Pokazano też, że wpływ szczelin przelewowych na przepływ w układzie jest niewielki, kiedy pułapka jest pusta, ale znaczący, gdy znajduje się w niej kropla. Są to wyniki ważne, kładące podwaliny pod fizyczny model działania pułapki.

Niezwykłe ciekawa i ważna wydaje się praca B, w której – korzystając z idei szczelin przelewowych – skonstruowano złącze mikrofluidyczne wymuszające kierunek przepływu do jednego z wyjść. Konstrukcja takiego złącza ma fundamentalne znaczenie dla tworzenia efektywnych układów logiki sekwencyjnej opartych o mikrofluidykę kropelkową. Tradycyjne złącza kierowały kropelki mniejszych rozmiarów (o wielkości porównywalnej ze średnicą kanałów) do wyjścia o większym przepływie. Biorąc jednak pod uwagę, iż obecność kropli zmienia opór hydrauliczny kanału, do którego wpłynęła, kolejna kropla była niekoniecznie kierowana do tego samego kanału, co prowadziło do efektów, które – choć ciekawe ze względu na swoją nieliniowość – utrudniały precyzyjną kontrolę ruchu kropel. Złącze zaproponowane przez p. Zarembę radzi sobie z tym problemem wysmienicie, zawsze kierując krople do tego samego ujścia – dzieje się tak zarówno dla krótkich kropli, jak i – w szerokim zakresie prędkości przepływu – dla kropli długich.

Element ten został następnie wykorzystany w kolejnej istotnej i bardzo eleganckiej pracy C, gdzie pokazano jak budować elementarne układy logiki sekwencyjnej, takie jak np. przerzutnik typu T, który został zrealizowany za pomocą pętli bimodalnej. Układ ten został następnie rozbudowany do postaci licznika dziesiętnego, a następnie kaskadowego licznika potrafiącego liczyć do tysiąca (z cyfrą setek, dziesiątek i jedności). Autor Rozprawy zaproponował też modyfikację licznika dziesiętnego, skonstruowaną w ten sposób, aby krople zliczane nie mieszały się następnie z kroplami pokazującymi stan układu. Skonstruował również liczniki binarne oraz permutator kolejności kropli w sekwencji. Wszystkie te projekty są bardzo eleganckie i zdają się działać w wysoce deterministyczny, precyzyjny, powtarzalny i wolny od zakłóceń sposób. W konkluzjach artykułu C autorzy piszą o pięknie czysto hydrodynamicznych układów kontroli i nie sposób się z tym nie zgodzić – obserwowanie ich pracy (czego miałem okazję osobiście doświadczyć) ukazuje nie tylko ich niezawodność, ale jest również zachwyca pod względem estetycznym.

Kolejną ważną pracą w tym cyklu jest praca D, w której autorzy projektują stosunkowo proste, lecz bardzo pomysłowe urządzenie mikrofluidyczne, za pomocą którego można otrzymać krople o danym stężeniu, za pomocą mieszania i dzielenia kropli. Znowu dostajemy urządzenie, które dzięki swojej prostocie jest bardzo niezawodne i może być uruchomione bez specjalnych inwestycji aparaturowych, gdyż wymaga do pracy tylko dwukierunkowej pompy, którą każdy adept mikrofluidyki i tak posiada.

Dwie ostatnie prace włączone w cykl (E i F), choć alfabetycznie ustawione na końcu powstały – jak sam Autor pisze – w początkowym okresie jego studiów. Praca E analizuje szczegóły procesu powstawania kropli w złączu typu T dla prostokątnych kanałów i pokazuje w szczególności, jak ważny dla zrozumienia zachowania tego złącza przy niskich liczbach kapilarnych jest przepływ fazy ciągłej w rogach kanału dookoła kropli. Badania te mogły być inspirujące dla Autora w jego dalszej pracy naukowej, gdyż motyw wykorzystania przepływu fazy ciągłej do zmiany zachowań kropeł przewija się przez wszystkie właściwie jego prace. Wreszcie praca F analizuje wpływ efektów bezwładnościowych na przepływy pojedynczej fazy w kanałach mikrofluidycznych, w szczególności studiując rozkład przepływów w złączach dla różnych kątów, pod którymi kanały spotykają się. Udział również i w tych badaniach był ważny dla Autora, ze względu na pokazanie, jakie czynniki wpływają na opór hydrauliczny poszczególnych części układu mikrofluidycznego i – w szczególności – kiedy można w ogóle stosować liniowy związek między przepływem a różnicą ciśnień. Reżim ten (którzy autorzy pracy F definiują jako $Re < 10$) będzie bardzo ważny dla Autora Rozprawy w dalszych pracach, gdyż pozostawanie w obszarze liniowym pozwala na prawie pełną kontrolę nad zachowaniem kropeł.

Z powyższego, z konieczności skrótowego, przeglądu prac składających się na Rozprawę Doktorską wyłania się obraz konsekwentnej drogi naukowej Autora, od współuczestniczenia w badaniach projektowanych przez innych do tworzenia własnych konstrukcji mikrofluidycznych i wyznaczania nowych kierunków badań. Rozprawa robi ogromny krok naprzód w kierunku rozwinięcia w pełni zautomatyzowanych układów mikrofluidycznych opartych o kontrolę hydrodynamiczną, ale oczywiście wiele jeszcze na tym polu pozostaje do zrobienia i jestem przekonany, że Autor w toku swojej dalszej kariery naukowej (jeśli taką ścieżkę wybierze) może wnieść tu jeszcze niejedną znaczący wkład.

Choć obowiązkiem Recenzenta jest też wskazanie słabszych punktów Rozprawy, w przypadku tak dobrego cyklu prac jak niniejszy, nie jest to zadanie łatwe. Jedyne co wydaje mi się mogłoby być głębiej przeanalizowane to ograniczenia, które trzeba narzucić na układ, by ten mógł efektywnie funkcjonować. Jakie są przykładowo minimalne odległości między kolejnymi przeszkodami w pętli licznika dziesiętnego lub pomiędzy poszczególnymi elementami urządzenia do generowania kropeł o żądanym stężeniu? Jak to wpływa na efektywność i tempo pracy tych urządzeń z jednej strony, a niezawodność ich pracy z drugiej? Tempo pracy tych urządzeń to może ich jedyny mankament, gdyż – jak się zdaje – nie mogą one pracować specjalnie szybko – wiele z nich np. opiera się na odwróceniu kierunku przepływu w układach za pomocą pompy, co związane jest z pewną wewnętrzną skalą czasu. Jestem ciekaw zdania Autora na temat możliwości uzyskania większych prędkości ich pracy – czy jest tu jakaś granica, którą ciężko nam będzie przekroczyć?

Podsumowując, nie ulega dla mnie wątpliwości, że Rozprawa Doktorska mgra inż. Damiana Zaremby stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i spełnia wymagania ustawowe i zwyczajowe stawiane rozprawom doktorskim. Wnoszę o dopuszczenie mgra inż. Damiana Zaremby do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Jednocześnie, stawiam wniosek o wyróżnienie Rozprawy, jestem bowiem przekonany, że prace zawarte w Rozprawie otwierają nowy kierunek w konstrukcji architektur mikroprzepływowych: dzięki innowacyjnemu wykorzystaniu szczelin przelewowych i przeszkód zatrzymujących krople budować możemy dowolnie złożone mikrofluidyczne automaty skończone, których stan określany jest konfiguracjami kropli w układzie.

P. Szymura